

Simulación del Radiómetro a 30 GHz de la Misión Planck

B. Aja, M.L. de la Fuente, J.P. Pascual, E. Artal

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones.

Universidad de Cantabria

beatriz@dicom.unican.es

Abstract- Global system performance of the 30 GHz Planck mission radiometer has been simulated to debug critical specs of individual components reducing the number of required prototypes. Special emphasis was put on trading off effective bandwidth and sensitivity. Other figures of merit evaluated were gain and noise temperature balance between Front End Module (FEM) and Back End Module (BEM) of the radiometer. Nevertheless real operation of the radiometer will be in switched mode for 1/f noise suppression, total power mode was considered for the simulation, which is enough to check the referred parameters in a quasi-static approach. The simulations were done in the frequency domain using ideal models and measurement based models.

I. INTRODUCCIÓN

Los radiómetros de la misión científica Planck de la Agencia Europea del Espacio (ESA) están diseñados para operar a diferentes frecuencias del margen de las ondas milimétricas y submilimétricas [1]. El lanzamiento del satélite está previsto para el año 2007. Llevará dos instrumentos, el de baja y el de alta frecuencia. El primero se basa en radiómetros diferenciales con amplificadores de muy bajo ruido, enfriados a 20 K, con tecnología de transistores HEMT de InP en su módulo frontal (FEM). Tiene tres bandas de recepción: 30, 44 y 70 GHz. La amplificación en el módulo posterior (BEM) se realiza con tecnología de transistores HEMT de AsGa a temperatura ambiente (aproximadamente 300 K) para 30 y 44GHz.

En esta comunicación se describen algunos resultados de la simulación del sistema completo de 30 GHz (FEM + BEM) en el dominio de la frecuencia, empleando modelos ideales y modelos basados en medidas de los diversos componentes, con especial énfasis en la evaluación de parámetros como la distribución de ganancia y ruido entre el FEM y el BEM, o el equilibrio entre ancho de banda efectivo y sensibilidad. La naturaleza ruidosa de las “señales” a medir (inmersas bajo el propio ruido del sistema) modifica el modo de predecir el correcto funcionamiento del radiómetro si se compara, por ejemplo, con un receptor de microondas de un sistema de comunicaciones.

La sensibilidad viene dada por la expresión [2]:

$$\frac{\Delta T}{T_{sys}} = \frac{1}{\sqrt{BW_{eff} \tau}} \quad (1)$$

Donde BW_{eff} el ancho de banda efectivo en radiofrecuencia antes de detectar la señal y τ la constante de tiempo de integración del filtro paso bajo que se situará tras el detector. ΔT es la mínima variación de la temperatura que se puede detectar, es decir, la sensibilidad en temperatura, y T_{sys} la temperatura de ruido del sistema que realiza la medida [2].

La forma de calcular el ancho de banda efectivo BW_{eff} de un receptor viene descrita por:

$$BW_{eff} = \frac{\left[\int_0^\infty G(f) df \right]^2}{\int_0^\infty [G(f)]^2 df} \quad (2)$$

Siendo $G(f)$ la ganancia del receptor en la banda de milimétricas en función de la frecuencia. En una primera aproximación se puede calcular el ancho de banda efectivo empleando las ganancias de RF, suponiendo un detector perfecto. En un segundo abordaje más riguroso se incorpora el modelo del detector, y en ese caso el ancho de banda se evalúa sobre la característica de transferencia RF-DC. El valor deseado para este parámetro en el sistema global es un 20% de la frecuencia central (6 GHz para una frecuencia central de 30 GHz). La plataforma de simulación empleada ha sido ADS de Agilent Technologies.

II. ESQUEMA Y FUNCIONAMIENTO

A. Diagrama de bloques y Principio de Operación.

El esquema básico del radiómetro se muestra en la Fig. 1.

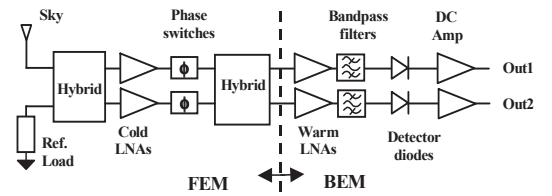


Fig. 1. Diagrama de bloques del radiómetro Planck.

La línea discontinua separa FEM del BEM. El primero tiene dos entradas: por la superior (según la Fig. 1) recibe la señal del cielo y por la inferior de la carga fría que actúa como referencia. Ambas señales se combinan sucesivamente en dos híbridos con una etapa de amplificación de bajo ruido y un desfaseador conmutable en cada rama. Las salidas del último híbrido se conectan mediante guías de ondas al BEM

que vuelve a amplificar la señal, además de filtrar y conformar la banda, para finalmente aplicarla a sendos detectores que proporcionan niveles de continua proporcionales a las señales del cielo o de la referencia, según se configuren los desplazamientos de fase. Si se emplean híbridos de 180 grados, con ambos conmutadores de fase fijados a 0 grados, las señales en las salidas de ambas ramas serán: referencia en la superior y cielo en la inferior. Si los cambiadores de fase se fijan a 0 el de la rama superior y 180 grados el de la rama inferior, entonces las señales a la salida se invierten, apareciendo la señal del cielo en la rama superior y la referencia en la inferior. Para la simulación en modo de potencia total no se considera la operación diferencial que se produce cuando se conmutan los desplazamientos de fase en el conmutador de fase de la rama inferior para la cancelación del ruido de tipo 1/f en el sistema [3]. Para el modo diferencial se requeriría otro tipo de análisis al aparecer una escala de tiempos diferente de la de la banda de microondas. Por ello los análisis se han hecho en el dominio frecuencial, en pequeña señal, en modo de análisis de ruido y en balance armónico. En este dominio la simulación del sistema es compatible con las herramientas de diseño empleadas de los componentes de microondas del radiómetro.

B. Modelos de los componentes

Los elementos empleados para emular las respuestas de los diversos componentes que no habían sido diseñados en la UC (FEM y detector) se han tomado de diversas librerías del ADS, entre ellas la librería de sistemas. Para las partes que se diseñaron en la UC (RF-BEM), además de modelos idealizados, se disponía de medidas de prototipos de amplificadores y filtros así como de esquemas circuitales completos de algunos de ellos [4]. Se han tenido en cuenta incluso ligeras diferencias de comportamiento entre dos unidades distintas de prototipos distintos de amplificadores para el FEM y el BEM (denominadas FEM1/2, BEM1 /2) para estudiar su interacción y el efecto en el equilibrio del sistema . Uno de los elementos más críticos es el modelo del amplificador bajo ruido del FEM. Para ello se ha empleado el amplificador de librería y sendos filtros a la entrada y a la salida del amplificador para definir la respuesta frecuencial. (Fig. 2: medidas, Fig. 3: modelado).

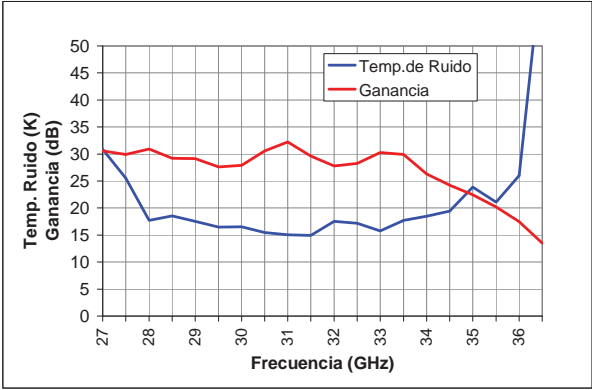


Fig. 2. Medidas amplificador FEM.

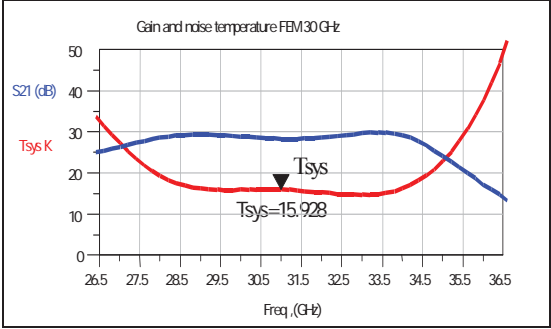


Fig. 3. Modelo para simulación amplificador FEM.

En la siguiente tabla aparecen los valores de temperatura de ruido (T_{sys}) y ancho de banda efectivo (B_{weff}), diferenciados para dos modelos que representan a dos unidades distintas de amplificadores del FEM:

FEM	T_{sys} (K)	B_{weff} (GHz)
FEM 1	21.45	10.22
FEM 2	13.67	10.22

Para los cambiadores de fase se emplea el modelo disponible de la librería de ADS. Para modelar los amplificadores de RF del BEM se han empleado dos alternativas: bloques ideales de amplificación más filtros y cajas de parámetros medidos. En la siguiente tabla aparecen los valores diferenciados para dos modelos que representan dos versiones de amplificadores del BEM:

BEM	T_{sys} (K)	B_{weff} (GHz)
BEM 1	438.44	7
BEM 2	438.44	8.83

Los detectores son modelados usando un filtro de librería cargado con una resistencia y un diodo en serie terminado con un filtro RC por el lado de DC. Los valores de los elementos se escogen para reproducir simultáneamente la adaptación de entrada, la sensibilidad mV/mW y el punto de compresión 1 dB. En la Fig. 4 se muestra la adaptación de entrada del modelo de detector. La respuesta RF-DC del detector a un barrido de potencia de un tono de 30 GHz se muestra en la Fig. 5.

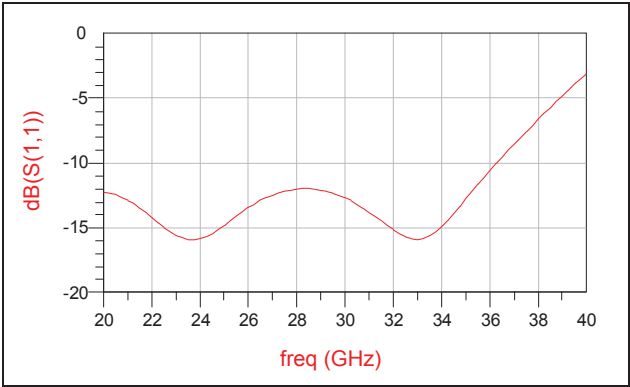


Fig. 4. Adaptación de entrada del detector.

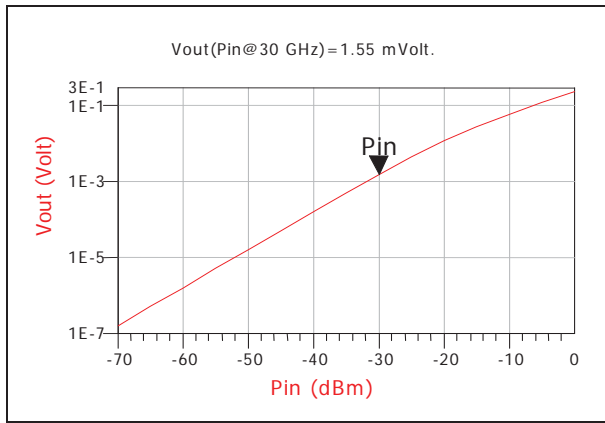


Fig. 5. Tensión DC a la salida frente a potencia de RF a 30 GHz.

Para los amplificadores de DC se emplea el modelo incluido en la librería de ADS.

C. Simulaciones de Interés

Las simulaciones del sistema se han hecho en el dominio de la frecuencia considerando diversos casos con entradas y salidas en RF o bien con entradas en RF y salidas en DC (cuando se incorporaba el modelo de detector). Este último caso requiere la simulación mediante balance armónico.

El primer objetivo de la simulación fue verificar que para cada combinación de valores de los desfases las señales de salida aparecían claramente diferenciadas en las ramas correspondientes, señal del cielo por un lado y referencia por otro, con aislamiento suficiente. La ganancia de transmisión total (FEM+BEM) deseada es del orden de 65 dB en la banda. El aislamiento se obtiene de restarle a esta cifra la transmisión a la puerta aislada. Se comprobó que con ramas idénticas con adaptaciones ideales en todos los componentes el aislamiento era prácticamente perfecto (del orden de 320 dB) mientras que con amplificadores e híbridos más realistas el aislamiento disminuía a valores en torno a 60 dB, que, no obstante, son considerados aceptables. En el parámetro del aislamiento no solo influyen las desadaptaciones, sino también la precisión en los cambiadores de fase. En la Fig. 6 se muestra la variación de la transmisión a la puerta aislada cuando la fase se barre en torno al valor deseado de 180 grados. Como se ve en la gráfica un error de fase de 2 grados respecto a los 180 ideales incrementa la transmisión indeseada (que debería ser la mínima) del orden de 30 dB.

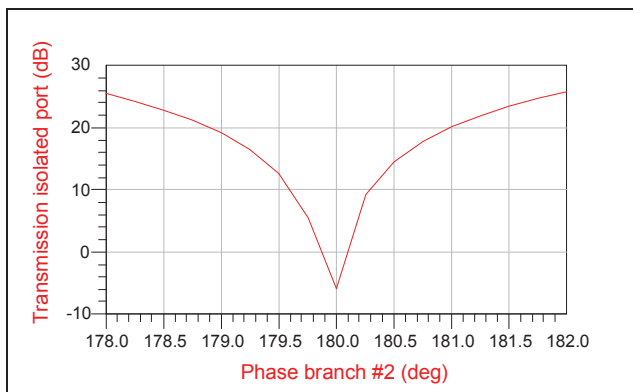


Fig. 6. Empeoramiento del aislamiento entre las salidas por desviaciones en los cambiadores de fase.

Para estudiar con detalle el balance entre ganancia y temperatura de ruido entre el amplificador del FEM y el del BEM (sólo RF) se ha simulado solamente una rama empleando modelos que emulaban a prototipos concretos. En la figura 8 se muestra los resultados correspondientes a la combinación de los modelos denominados FEM1 y BEM1. Se obtiene un valor de temperatura equivalente de ruido de 16.64 K a 30 GHz.

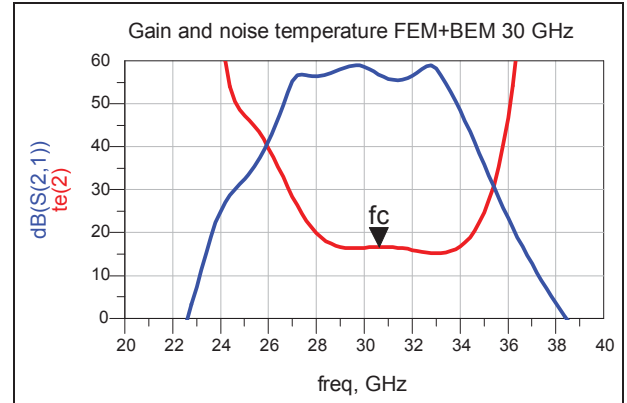


Fig. 7. FEM-1+BEM-1 Respuesta de ganancia y temperature equivalente de ruido (solo en RF).

Para obtener la temperatura de ruido promediada en toda la banda conforme a la formulación definida en [5] (que tiene en cuenta las variaciones frecuenciales de la ganancia y el ruido) se integra en la banda simulada (22-40 GHz) obteniéndose que la temperatura equivalente de ruido es de 17.7 K. Aplicando la ecuación (2) integrada en la banda (22-40 GHz) se obtiene que el ancho de banda efectivo es de 6.68 GHz. Para estimar la sensibilidad se aplica la ecuación (1). Este cálculo se hace suponiendo un filtro paso bajo de post-detección con un tiempo de integración de 66 msec (según el ancho de banda de la salida). El valor hallado es $\Delta T = 8.44 \text{e-}4 \text{ K}$.

Para realizar un estudio de la relación ancho de banda efectivo- sensibilidad los cálculos anteriores se han repetido para las combinaciones de las dos variantes de FEM y BEM, obteniéndose la siguiente tabla de valores:

Caso	Tsys (K)	Bweff (GHz)	Tau(seg)	$\Delta T(K)$
FEM1BEM1	17.726	6.68	0.066	8.44e-4
FEM1BEM2	18.33	7.58	0.066	8.2e-4
FEM2BEM1	11.29	6.68	0.066	5.37e-4
FEM2BEM2	11.68	7.58	0.066	5.22e-4

Como se aprecia comparando con las tablas de valores individuales de los amplificadores de cada rama, es la temperatura equivalente de ruido del FEM la que marca principalmente la sensibilidad, mientras que las diferencias en ancho de banda efectivo del BEM tienen escasa influencia.

También dentro de dicho estudio se han realizado simulaciones en las que se fijaba el ancho de banda efectivo del FEM (BWeff FEM 1: 10.22 GHz) y se realizaba un barrido del ancho de banda 3 dB del BEM (e indirectamente de su ancho de banda efectivo). Los resultados de ancho de banda efectivo global aparecen en la Fig. 8 y en la Fig. 9 se superponen con la temperatura equivalente y con la sensibilidad.

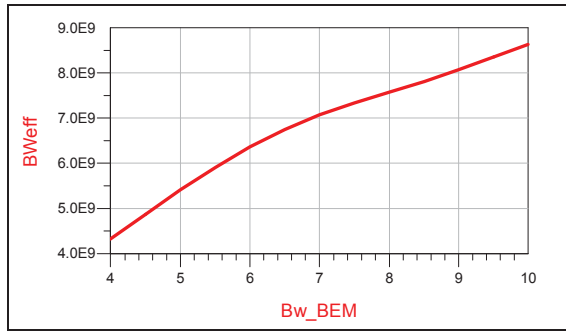


Fig. 8. BWeff (Hz) del sistema (FEM-1+BEM) frente al ancho de banda 3dB del BEM (GHz)

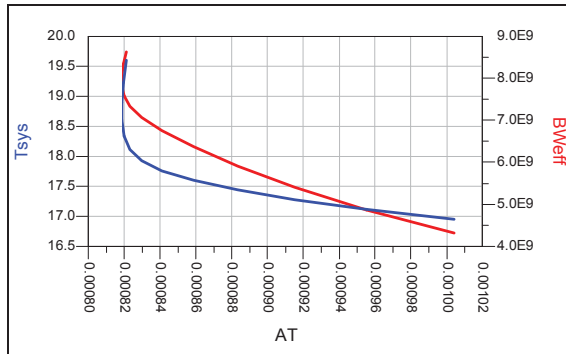


Fig. 9. ΔT (sensibilidad (K)) respecto BWeff (Hz) del sistema y temperatura equivalente de ruido del sistema T_{sys} . (K).

También se ha realizado la simulación en potencia del sistema. Dados los bajos niveles de las señales de entrada se ha considerado conveniente simular en potencia detalladamente el BEM, que es donde se podría producir una saturación del detector o de las últimas etapas del amplificador de RF del BEM. En la Fig. 10 se muestra la curva modelada para replicar las medidas. Los niveles esperados a la entrada del BEM quedarán en la zona lineal, dado que la máxima potencia esperada a la entrada del FEM es de unos -95 dBm y su ganancia está en torno a 30 dB.

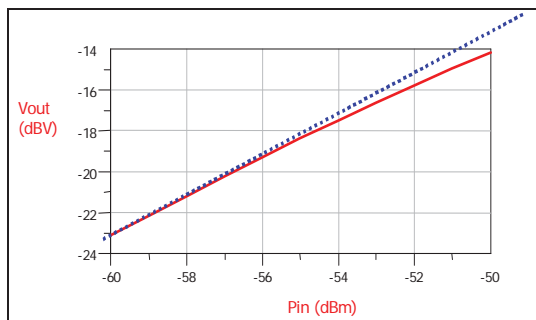


Fig. 10. Simulación de la respuesta RF-DC del BEM a un tono de 30 GHz. Se superpone la respuesta ideal lineal (línea discontinua).

Se ha realizado la simulación FEM+BEM (RF)+detector para obtener la respuesta en DC global a un barrido en frecuencia de un tono con una potencia estimada para ser del orden de la que entrará desde la referencia en la operación real del sistema (el referido valor de -95 dBm). Los resultados de tensión a la salida del detector aparecen en la Fig. 11.

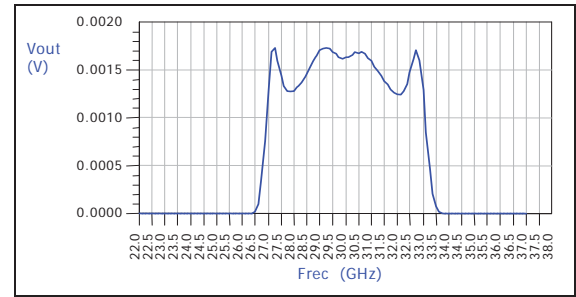


Fig. 11. Respuesta simulada en DC del modelo de radiómetro completo a un tono de -94.8 dBm.

III. CONCLUSIONES

La conclusión que se obtiene de estas simulaciones es que los actuales valores previstos (cuya viabilidad ha sido corroborada por medidas experimentales) de ganancia, temperatura equivalente de ruido y ancho de banda efectivo son operativos y funcionales y resultan adecuados para los objetivos de la misión. Respecto al equilibrio entre ancho de banda efectivo y sensibilidad del radiómetro. Sobre esto se sacan varias conclusiones: el ancho de banda efectivo es siempre ligeramente mayor que el ancho de banda 3 dB, el ancho de banda efectivo global (FEM+BEM) es siempre más estrecho que el de cada uno de los dos módulos por separado, y en particular que el del BEM, el filtrado fuera de la banda 27-33 GHz (estrictamente el 20 % de 30 GHz) aumenta ligeramente el ruido pero no empeora la sensibilidad del sistema porque incrementa el ancho de banda efectivo, siendo este último efecto más relevante.

Para mejorar la sensibilidad el elemento crucial es el ruido del FEM. Esta mejora es más importante que la que se obtendría ajustando el ancho de banda efectivo del BEM para que se ciña mejor a la banda del 20 %.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D+I, Programa Nacional de Espacio (ESP 2002-04141-c03-03). Los autores agradecen a Lluís Pradell y Pedro de Paco, de la UPC, su colaboración en proporcionar datos del detector y al equipo técnico del Jodrell Bank Observatory por proporcionar datos del FEM. También desean agradecer a Alexandrina Pana y a Eva Cuerno su esmerado trabajo en los montajes de los prototipos.

REFERENCIAS

- [1] ESA Astrophysics Home page of Science team of Planck: <http://sci.esa.int/planck>
- [2] F. Ulaby, R. More, A. Fung, "Microwave Remote Sensing" vol.1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Section 6-7. Artech House, 1981
- [3] J. Portilla, E. Artal, E. Martinez-Gonzalez, "Analysis of the 1/f-Noise Effects on the Planck Low-Frequency Instrument Receivers". Astrophysical Letters and Communications, Vol.37, pp.195-203, 2000
- [4] Artal, Aja, De La Fuente, Palacios, Mediavilla, Pascual, Portilla, "Low 1/f Noise 30 GHz Broadband Amplifiers For The Differential Radiometers Of The Planck Surveyor Mission" 31st European Microwave Conf. Proceedings, pp.61-64, Vol.2, London, 2001
- [5] "A new Method to obtain total power receiver equivalent noise temperature". B. Aja, JP Pascual, L de La Fuente, J. Gallegos, E. Artal, 33rd European Microwave Conf. Proceedings, pp.355-358. Munich 2003.